

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.230>



基于模拟月壤的贯入模块化试验

胡定坤, 李 谦*, 吕嘉航, 邹欣悦, 罗浩天

成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059

摘要: 为了解采样机具与模拟月壤间的相互作用, 同时验证月壤采样机具模块化建模的可行性. 基于中国地质大学(武汉)研制的 CUG-1A 型模拟月壤, 开展不同条件下机具贯入力载的试验研究, 并依据试验结果建立理论模型进行验证. 各机具在浅层模拟月壤贯入阻力平均增长率为 19.9%, 次浅层提升至 38.18%, 深层出现陡增达到 63.43%; 贯入速度对贯入阻力的平均误差为 2.5%; 不同入土角度下贯入阻力的平均增长率为 62.85%; 不同截面机具贯入阻力随截面面积增长而增长, 值近似为 1:2:3:4. 同时进行了机具结构模块化验证, 理论模型与试验结果吻合度在 85% 以上. 采样机具所受贯入阻力与贯入深度、方式和机具结构明显相关, 可建立模块化理论模型准确预估不同条件机具的贯入阻力.

关键词: 表层贯入; 模块化; 贯入阻力; 机土作用; 模拟月壤; 土力学; 工程地质.

中图分类号: P691

文章编号: 1000-2383(2024)03-1052-14

收稿日期: 2022-03-20

Penetration Modular Test Based on Lunar Soil Simulant

Hu Dingkun, Li Qian*, Lü Jiahang, Zou Xinyue, Luo Haotian

College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China

Abstract: To understand the interaction between sampling machines and lunar soil simulant, and to verify the feasibility of modular modeling of lunar soil sampling machines. The experimental study on mechanical penetration load under different conditions was carried out, based on the CUG-1A lunar soil simulant developed by China University of Geosciences (Wuhan), and the theoretical model was established based on the experimental results for verification. The average growth rate of penetration resistance of each machine in the shallow simulation of lunar soil was 19.9%, which was increased to 38.18% in the shallow simulation, and 63.43% in the deep simulation. The average error of penetration velocity to penetration resistance was 2.5%; the average growth rate between penetration angle and penetration resistance was 62.85%; the penetration resistance of different cross-section machines was approximately 1:2:3:4. At the same time, the modular verification of the machine structure was carried out, and the accuracy of the test and model can reach more than 85%. The penetration resistance of sampling machines is significantly correlated with penetration depth, mode and machine structure, and the modular theoretical model can be established to accurately predict the penetration resistance of machines under different conditions.

Key words: surface penetration; modularization; penetration resistance; mechanical soil action; simulated lunar soil; soil mechanics; engineering geology.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 11502034, 42072344); 四川省自然科学基金项目 (No. 2022NSFSC0991).

作者简介: 胡定坤 (1997-), 男, 硕士研究生, 从事月壤量化扰动特征的研究. ORCID: 0000-0002-1198-1583. E-mail: 13696245664@163.com

* 通讯作者: 李谦, ORCID: 0000-0003-1535-7734. E-mail: liqian2014@cdu.edu.cn

引用格式: 胡定坤, 李谦, 吕嘉航, 邹欣悦, 罗浩天, 2024. 基于模拟月壤的贯入模块化试验. 地球科学, 49(3): 1052-1065.

Citation: Hu Dingkun, Li Qian, Lü Jiahang, Zou Xinyue, Luo Haotian, 2024. Penetration Modular Test Based on Lunar Soil Simulant. *Earth Science*, 49(3): 1052-1065.

为应对日常生产、生活中对矿产资源等不可再生资源的需求,月球被视为深空探测和可持续开发的首要试验场,而针对月壤的采样研究就具有重要意义(吴伟仁和于登云,2014;蔡黄河和彭振斌,2015;潘永信和王赤,2021;顾钦等;2022)。采样时机具所受贯入阻力不仅取决于机具本身,还与月壤的颗粒形态、粒径分布与密实程度等物理力学特性有关,为此国内外学者对月球采样机具与月壤之间的相互关系进行了大量研究。唐钧跃(2020)针对月面钻取任务中被钻对象物理力学性质具有随机性和不确定性的特点完成了自适应钻进特性研究,并针对高密实度月壤钻进力载和取心率随钻进工艺参数分布规律优选了适合密实月壤钻进取心的规程参数。庞勇等(2019)通过钻取试验监测月壤大颗粒在不同位置时的运移特性对机具钻进力载的影响,发现表面平整的大颗粒,在偏置距离较小时容易造成堵钻。刘德赞等(2018)针对可能存在冻土的月球极区,开展了冻土模拟月壤钻进试验,发现冻土类月壤较不含水月壤钻进力载更大,且增长更快。朱燕鸥(2014)以玄武岩颗粒模拟月壤,利用外螺旋杆研究了颗粒对钻进负载的影响,随着月壤钻进深度的增大,所需钻进压力及扭矩会相应增大;且随钻进刀具的尺寸增大,切削阻力矩也增大。赵振家(2014)以JLU-2模拟月壤为介质进行了表取采样试验,对铲取、挖取过程中的力学关系进行了研究,在较低的速度范围内,速度对铲取阻力影响较小,入土角度与密实度对铲取阻力影响较大,均呈现为正相关。高辉等(2014)采用模拟月壤进行地面表层采样试验,研究了月壤特性和采样方式对采样过程的影响。田野等(2012)针对月面采样需求,建立外螺旋钻杆输土阻力矩力学模型,得到阻力矩随钻进深度增加而增加的变化关系曲线,并对钻具结构参数进行了优化。Quan *et al.*(2017)为适应行星风化层的复杂力学性质建立了钻进载荷模型,同时利用能耗最小原则对其进行了优化。Chen *et al.*(2019)基于初等分析及Janssen模型建立了沿螺旋槽输送的动力学模型,揭示了螺旋钻输送能力与转速、钻速等参数之间的关系。Zhang and Ding (2017)提出了一种在月球表层土钻进过程中预测浸彻力与旋转力矩的数值模型并完成试验,结果表明同等钻孔速度下该参数与钻月深度有关,且对月壤中随机分布的岩石较为敏感。Zhao *et al.*(2019)为获得月球岩心钻的最佳运行参数,进行了一系列实验,其数据分析表明螺旋槽最大输送率与螺旋槽转速呈正比。Obermayr *et al.*(2011)建立了一种用于计算无粘性颗粒材料土壤

切削力的离散元模型,并与物理试验进行比较,揭示了不同切削宽度和深度下牵引力的变化规律。Agui *et al.*(2013)复制了月球勘测任务中的月壤取样器并进行采样试验,探究土壤密度及边壁条件对机具采样受力的影响,发现密实度增加会造成机具受力陡增,且不同边壁条件具有同样的破坏特征。美国科罗拉多矿业学院的Johnson and King(2010)使用研制的微型斗轮式挖掘机模拟月壤采样,研究了转速、挖取深度对采样机具受力的影响,发现挖掘深度、铲斗宽度和车轮转速对挖掘力的影响最大。Green and Zaccng(2014)通过模拟火星大气压环境(600 MPa),测试了大气压力、冲击频率、开挖速度和土壤相对密度对开挖力的影响,发现在高大气压力情况下,机具所受开挖力下降。Maciejewski *et al.*(2003)通过土槽试验台分析了挖斗斗齿数量对挖掘效率的影响。美国加利福尼亚大学伯克利分校的King *et al.*(2011)研究了自研机具贯入JSA-1A模拟月壤时二者的相互作用,发现切削深度对土-机具相互作用力有显著影响。

以上研究均偏向于整体机具与模拟月壤的力学特性研究,而未来将不可避免地要对月壤进行更深层次的科学探索,届时就需要不同种类的采样机具,完整机具不适合宇宙飞船进行运输,而模块化机具有易拆装、占地小、便于更换等特点。因此,为完成对月壤的采样任务,有必要开展不同钻进条件下模块化机具的机土作用力学特性研究。本文采用中国地质大学(武汉)研制的CUG-1A型模拟月壤,对其进行相应的贯入采样力学特性试验,探究不同机具贯入条件对贯入阻力的影响,以期为采样任务顺利完成及钻取机械的设计优化提供参考。

1 模拟月壤贯入阻力试验

1.1 试验流程及方案

试验前据试验方案将贯入机具、传感器与机械臂端头通过夹具连接,完成模拟月壤土样的制备;并通过软件控制机械臂驱动不同截面形状的机具贯入模拟月壤并测定贯入阻力,利用采集卡完成单次试验数据的采集;随后进行重复试验后更换机具、调整试验参数完成试验方案。

本文主要探究不同条件下不同贯入机具对模拟月壤贯入阻力带来的影响,改变采样机具的截面形状、尺寸、贯入角度和速度均会对贯入阻力带来明显影响。采样机具各表面在贯入模拟月壤时均受摩擦力作用,且机具进入土体带来的模拟月壤体积变

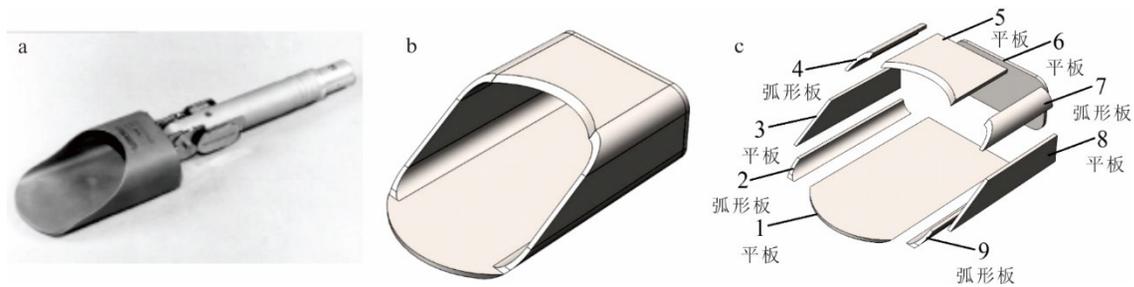


图1 Apollo计划使用采样铲及分解图

Fig.1 Apollo sampling shovel used and its breakdown diagram

表1 贯入阻力试验方案

Table 1 Penetration resistance test scheme

机具类型	贯入角度(°)	贯入速度(mm/s)	贯入深度(mm)	试验次数
空心方形、U形、L形、一字形	30 ^① 、40、45、50、60	5、10、15	60	4×5×3×3 ^② =180

注:①以水平向左的方向为0°,顺时针方向转动为正向;②重复试验3次。

化会改变土体密实程度;不同截面形状机具进入土体时,因其与模拟月壤的接触面积、贯入体积不同,引起的贯入阻力变化也不同。国内外相关表层采样设备的调研结果显示,各国形状各异的采样设备均可被拆分为数目不等的平板组合,如图1所示(Li *et al.*, 2019)。故本文采用空心方形、U形、L形、一字形4种不同截面的采样机具,测试其与贯入阻力之间的关系,且可利用4种不同截面机具验证采样机具模块化的可行性。对月壤采样方式的调研结果显示:表层采样30°~60°为最为常规的贯入角度,超过60°则采样方式倾向于垂直贯入,而小于30°采样量极小,效率过低(李谦等, 2021)。在试验机具运动能够完成的前提下,为使试验水平均匀设置,故采用30°、45°、60°作为变量测试其与贯入阻力之间的关系;由于贯入角度对贯入阻力影响方式复杂,故增加40°、50°两参数并采用结构稳定的U形、空心方形机具进一步探究贯入角度与贯入阻力间的关系。CUG-1A模拟月壤作为一种颗粒松散的粉状材料,采样机具贯入其中的速度过快或过慢分别会导致采样数据量过少或土体受扰塌落,故采用5、10、15 mm/s三个贯入速度测试其与贯入阻力之间的关系。考虑到本次试验模拟月壤样品量少,机具在贯入土体接近边界时会受边界效应影响,为减少该影响,控制机械臂使机具从土体中央贯入60 mm,确保贯入最深处与模型箱左右、下边界分别保持55 mm和40 mm的安全距离。试验设计方案如表1所示。

试验前依次完成试验设备的安装、调试,并进

行模拟月壤试样的制备。为模拟月球环境,将CUG-1A型模拟月壤进行烘干,待其冷却后取出适量完成制样;由于月壤在不同深度上其密度变化也会对力学性能产生影响,故需对照试验要求制备模拟月壤样本。制样时将模拟月壤铺撒至试样盒中,为减少撒土过程中土体下落冲力对下层土体的压实作用,在保证铺撒高度一致的情况下分层铺撒,并层层振荡密实直至达到试验高度。完成后在试样上施加重物静置,以接近真实月壤的密实程度,也使每次重复试验的土体状况可以保持基本一致。具体试验流程及机具贯入情况如图2所示。

1.2 试验设备

文中试验设备由xArm机械臂、传感器、采样机具及数据采集装置组成,并通过夹具完成组装,如图3所示。其中机械臂由6个关节模块组成,试验前依据试验方案,通过软件编程协调每一个关节的旋转角度以控制末端执行器的位置,从而通过控制末端执行器空间坐标、关节角度和运动速度来实现整个机械臂的运动过程;同时将机械臂各关节旋转速度设置为较低水平,以降低机械臂运动过程中可能会产生的震颤对试验带来的影响。

为简化影响因素和降低试验误差,将机具定为由平板组成的空心方形、U形、L形、一字形4种采样模型机具,其规格尺寸及截面形状如图4所示。

1.3 试验对象

试验材料采用由中国地质大学(武汉)研制的CUG-1A型模拟月壤,其无论成分还是物理力学性质均与真实月壤相近,且在制作过程中加入

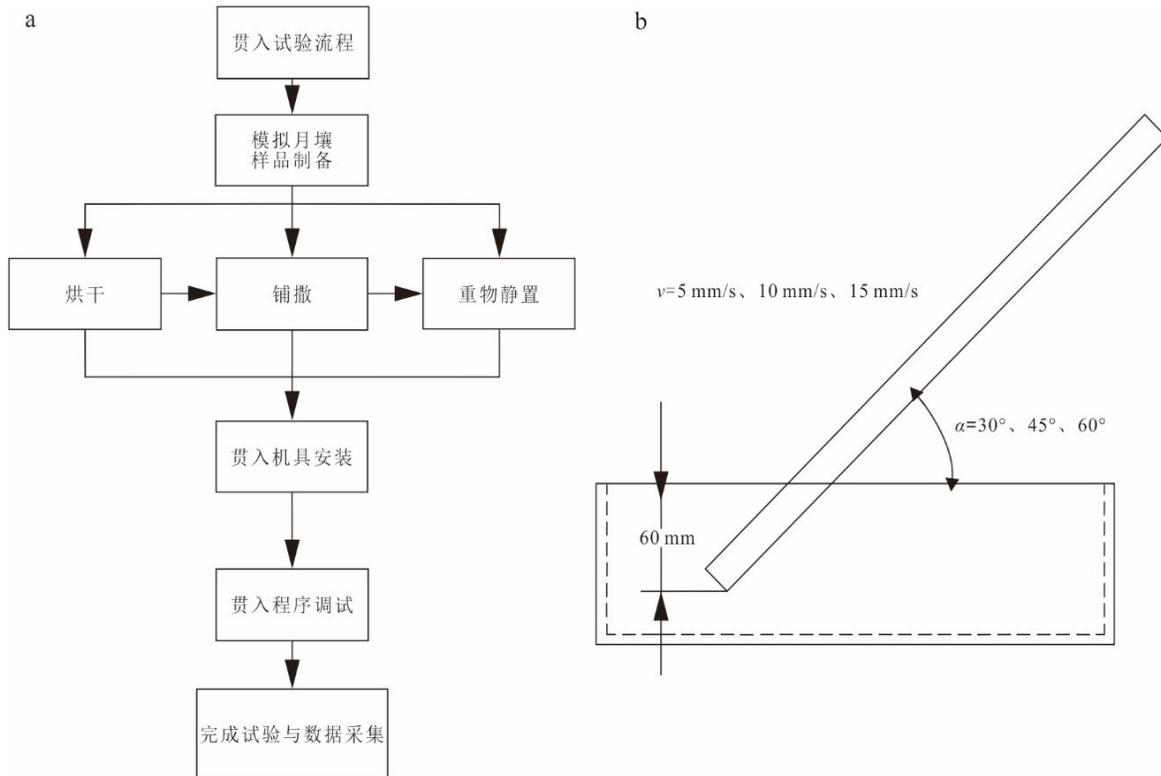


图 2 试验流程(a)及机具贯入模拟月壤(b)

Fig.2 Test process (a) and machine penetration into simulated lunar soil (b)

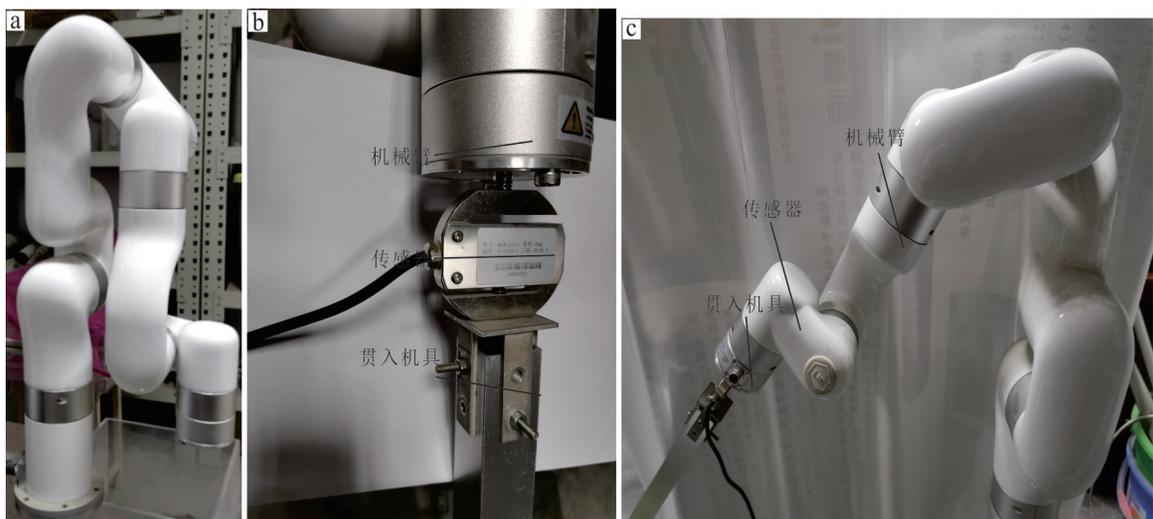


图 3 试验所用机械臂(a)与贯入机具固定设备(b)与机械臂运动状态(c)

Fig.3 The manipulator (a) used in the test, the fixed equipment of the penetration machine (b) and the motion state of the manipulator (c)

了一定的低密度材料,使之密度降低,能够尽可能地达到模拟月球真实的重力环境,模拟月壤实物、试样制作和实际机具贯入情况如图 5 所示(肖龙等,2009).CUG-1A 模拟月壤总体松散呈粉末状,颜色偏灰,粒径较为

均匀,无明显大颗粒,流动性较佳;主要组成为橄榄石、辉石和斜长石,同时伴有少量磁铁矿、磷灰石等矿物,与实际月壤的组成类似,其物理力学性质如表 2 所示.

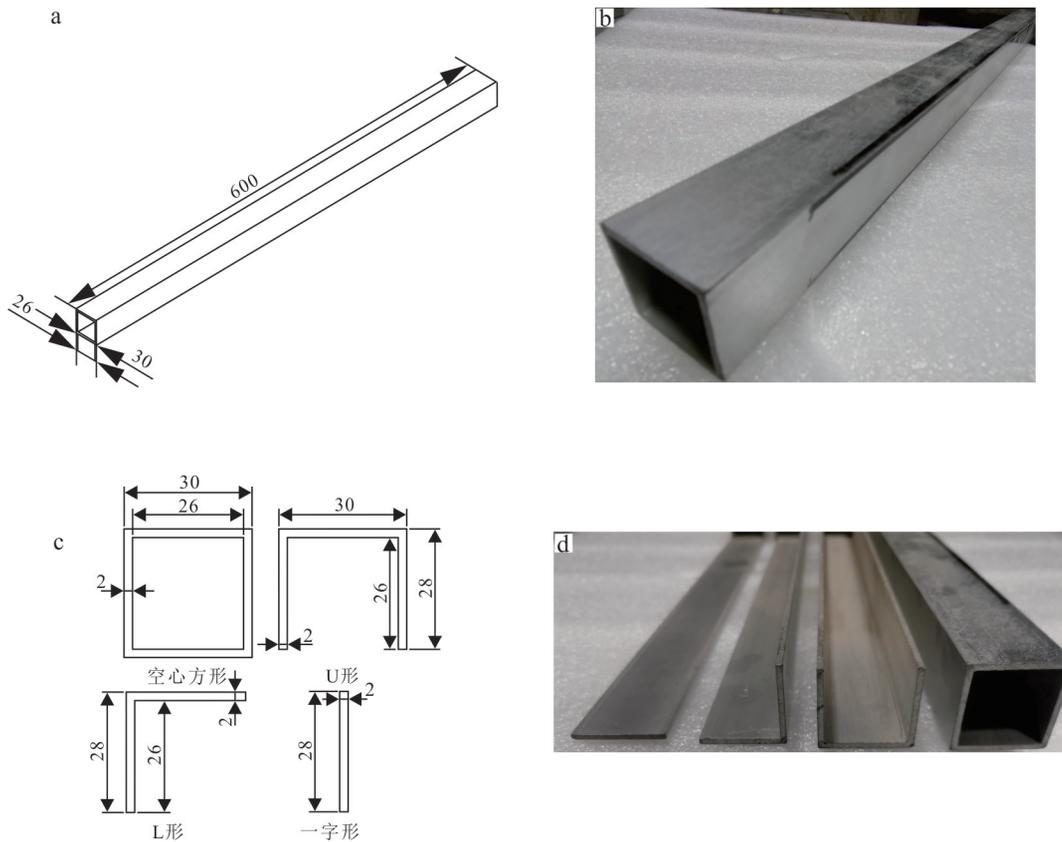


图4 贯入机具尺寸(mm)和实物照片

Fig.4 Penetration machine size (mm) and photos

表2 CUG-1A模拟月壤性质指标

Table 2 CUG-1A simulated lunar soil properties index

项目	数值
含水率 ω_0 (%)	0.240
湿密度 ρ (g/cm ³)	1.700
干密度 ρ (g/cm ³)	1.696
相对密度	2.611
孔隙比 E	0.569
孔隙率 φ (%)	36
压缩系数 α_{1-2} (MPa)	0.09
压缩模量 E_s (MPa)	17.43
内聚力 c (kPa)	1.36
内摩擦角 φ (°)	24.36

2 试验结果分析

2.1 试验结果趋势

本次模拟在保证制备土样性能相似的情况下,通过调整贯入角度、贯入速度及机具截面以完成试验,其贯入阻力随贯入深度变化趋势如图6所示.各类型试验条件下采样机具贯入阻力均随贯入深度增加而增加,同等试验条件下,一字

形、L形、U形和空心方形4种机具随截面面积变化,平均贯入阻力分别增长了12.35%、24.22%、32.3%和44.5%;随采样机具截面不断增大,其所受贯入阻力也随之增大并与机具间截面面积呈现出同等比例关系,L形、U形和空心方形机具平均贯入阻力分别达到一字形机具的200.3%、298.19%和389.78%;贯入角度一定时,贯入速度的变化对贯入阻力的变化无明显影响;贯入速度一定时,随贯入角度的增大机具所受贯入阻力也明显增长,以30°贯入角度为基础,45°和60°条件下平均贯入阻力分别增长了130.5%和171%.

2.2 增长率分析

在保持贯入角度、贯入速度一定的情况下,不同截面机具的贯入阻力最大值及变化范围如表3所示.模拟月壤作为一种松散的低密度材料,其密实度随深度增加而增大,故随着贯入深度增长,贯入阻力会随之增大,且机具截面面积增加也会造成贯入阻力增大;但不同试验条件下贯入阻力曲线随贯入深度增长的斜率不同,故对不同试验条件下的贯入阻力增长率做分析,增长率计算公式为:

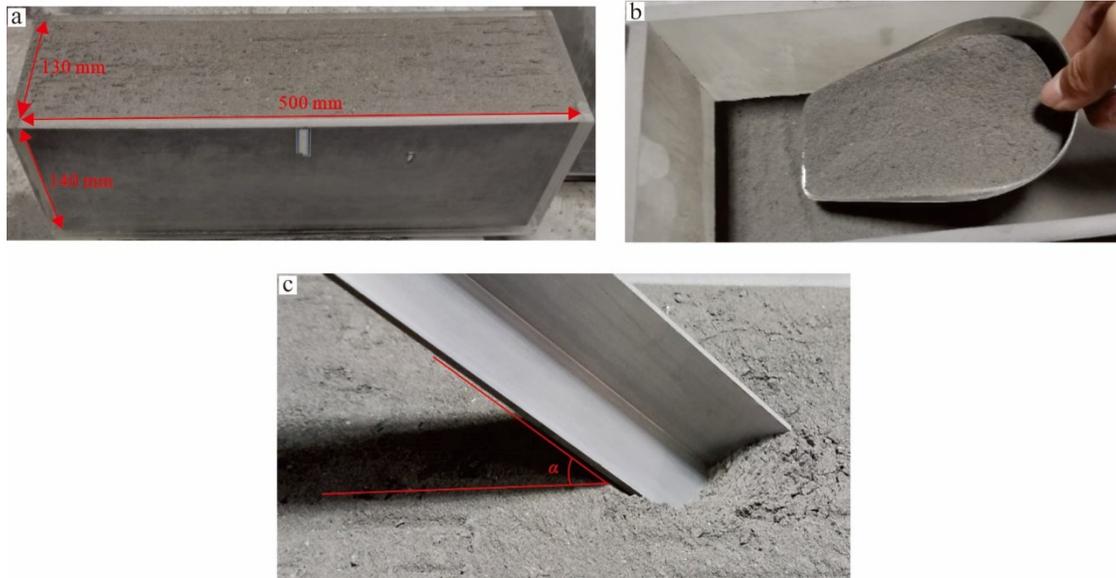


图 5 CUG-1A 模拟月壤实物(a)、试样制作(b)和机具贯入(c)

Fig.5 CUG-1A simulated lunar soil (a), sample preparation (b) and machine penetration (c)

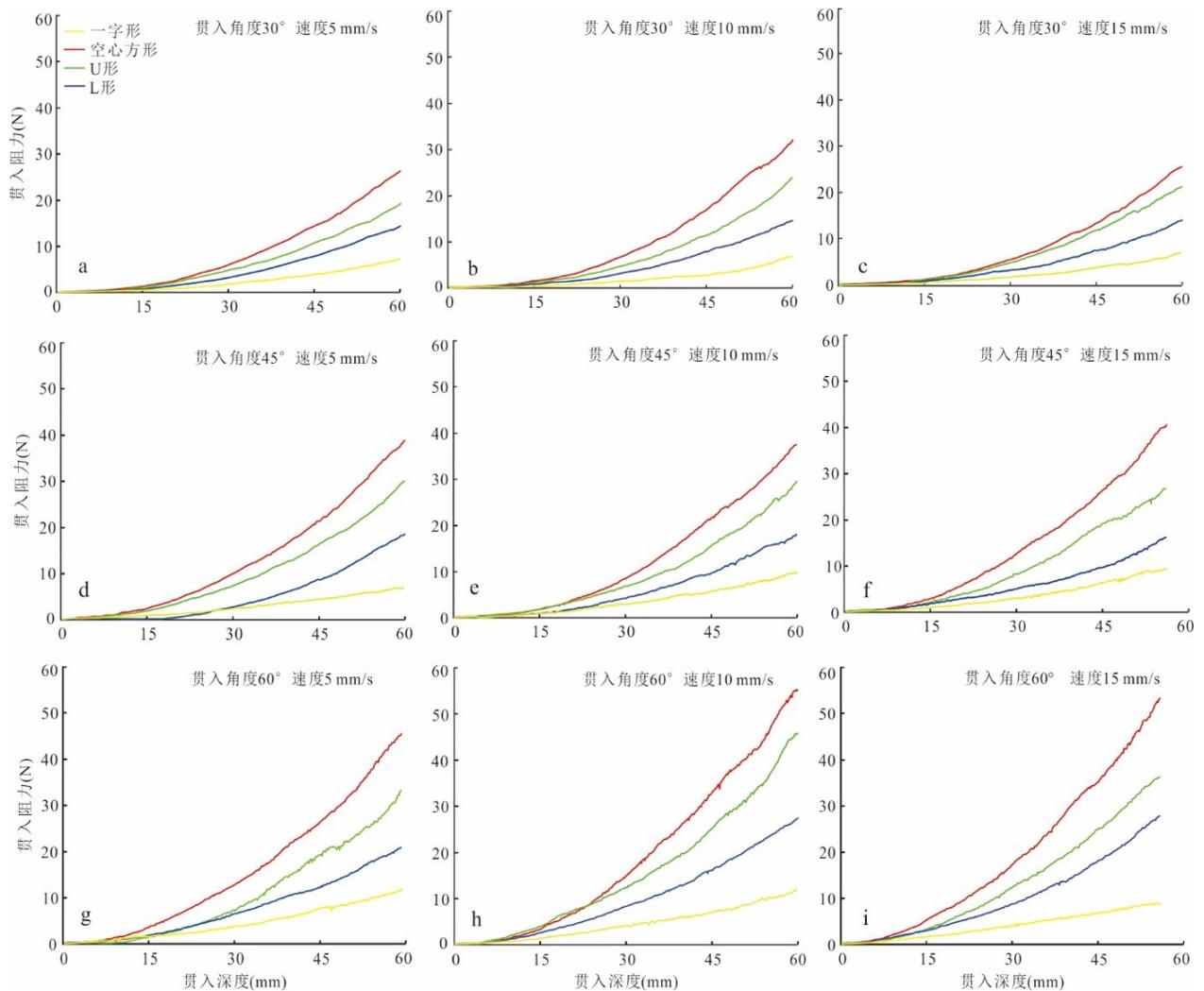


图 6 贯入阻力试验结果

Fig.6 Penetration resistance test results

$$R = \frac{\Delta N}{\Delta H} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, ΔN 为贯入阻力增长值, N; ΔH 为沿竖向深度的增长值, mm.

不同试验条件下 4 种截面机具不同贯入深度阶段的平均贯入阻力增长率如图 7 所示. 随着机具截面面积增大贯入阻力增长率也增大, 且各类型试验在 0~15 mm 的浅层深度时, 除 60°、5 mm/s 条件下 4 种机具对土体扰动较大, 贯入阻力平均增长率达到 39.12%, 其余试验组别贯入阻力平均增长率为 18.4% 左右; 随着机具进入 15~45 mm 的次浅层深度时, 除 60°、10 mm/s 条件下 4 种机具贯入阻力平均增长率为 38.47% 外, 其余 8 种试验条件下贯入阻力增长率均呈现平缓上升趋势, 相同贯入速度条件下不同机具随贯入角度增长, 贯入阻力平均增长率为 23.2%、39.98% 和 58.89%, 达到浅层深度的 2~3 倍; 而在进入 45~60 mm 的深层深度时, 随机具截面与贯入角度的增大, 贯入阻力以机具端部阻力为主, 故贯入阻力增长率出现陡增, 不同机具的贯入阻力平均增长率依次为 41.37%、73.1% 和 88.1%, 达到浅层深度的 2~5 倍, 同时贯入阻力也达到最大.

2.3 贯入速度分析

在其他试验条件一定的情况下, 仅改变采样机具的贯入速度, 各类机具贯入阻力随贯入深度的关系如图 8 所示. 同截面采样机具随贯入速度增加, 其达到目标试验深度时贯入阻力大小近似吻合, 其误差大小如表 4 所示. 同等截面形状和贯入角度条件下, 不同贯入速度下误差均小于 20%; 随贯入机具截面增大, 贯入阻力平均误差总体范围降低至 15% 以内; 而随贯入角度增大, 贯入阻力误差也不断增

表 3 不同机具最大贯入阻力

Table 3 Penetration resistance of different tools

贯入角度 (°)	贯入速度 (mm/s)	贯入阻力(N)			
		一字形	L形	U形	空心方形
30	5	7.41	14.53	19.38	26.70
30	10	7.05	14.87	24.04	32.35
30	15	7.34	14.20	21.40	25.65
45	5	7.18	18.70	31.15	38.85
45	10	10.14	18.44	29.83	37.66
45	15	9.51	16.22	26.79	40.66
60	5	11.87	20.72	32.82	44.92
60	10	12.08	27.52	45.97	55.42
60	15	9.00	27.82	36.42	53.41

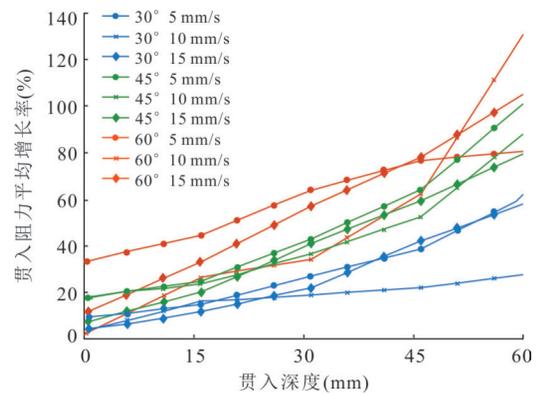


图 7 贯入阻力平均增长率

Fig.7 Average growth rate of penetration resistance

大. 故贯入速度主要影响贯入时间, 对贯入阻力几乎无影响; 且保持较低的贯入速度时, 各类采样机具贯入阻力曲线平缓, 所采集数据密度更大, 能更精细地表现出贯入阻力随贯入深度的变化情况, 故试验时采用低贯入速度可获得采集密度更大、更加稳定的试验数据.

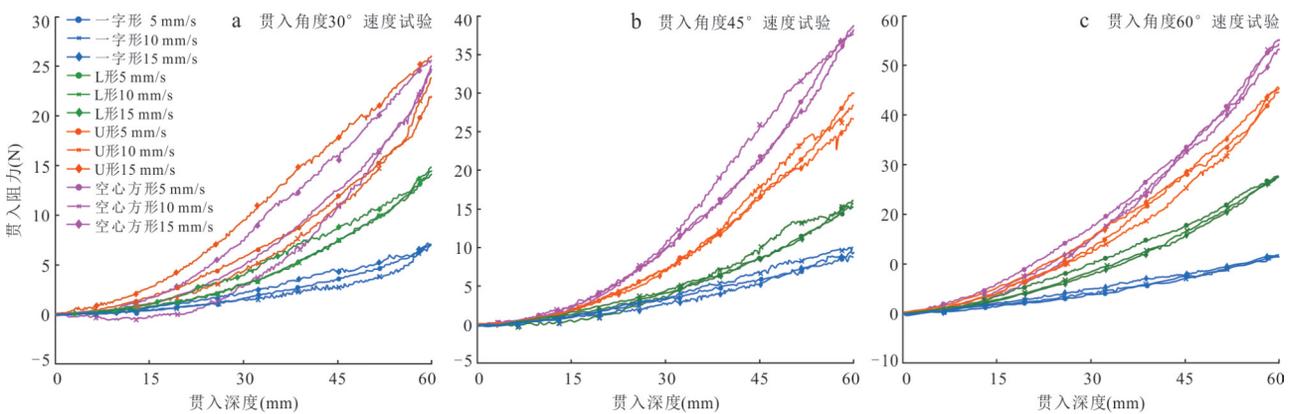


图 8 贯入速度对贯入阻力的影响趋势

Fig.8 The influence trend of penetration velocity on penetration resistance

表 4 不同贯入速度对贯入阻力误差

Table 4 Error of penetration resistance with different penetration velocities

贯入角度(°)	贯入速度(mm/s)	贯入阻力误差			
		一字形	L形	U形	空心方形
30	5	1.97%	-0.02%	-10.3%	-5.43%
30	10	-2.98%	2.32%	11.26%	14.58%
30	15	1%	-2.29%	-0.95%	-9.15%
45	5	-19.72%	5.13%	6.47%	-0.53%
45	10	13.38%	3.67%	1.96%	-3.58%
45	15	6.33%	-8.81%	-8.43%	4.11%
60	5	8.07%	-18.28%	-14.54%	-12.35%
60	10	9.98%	8.55%	19.7%	8.14%
60	15	-18.05%	9.73%	-5.16%	4.21%

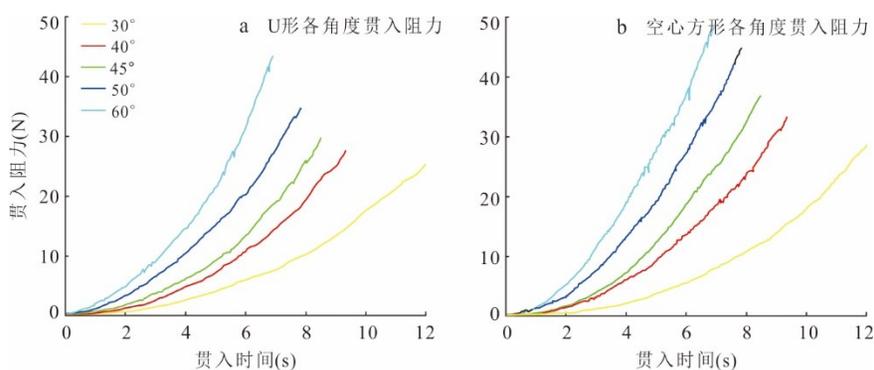


图 9 贯入角度试验

Fig.9 Penetration angle test

表 5 U形与空心方形机具各角度贯入阻力增长率

Table 5 Growth rate of penetration resistance of U-shaped and hollow square machines

贯入角度	30°	40°	45°	50°	60°	贯入阻力增长率范围
U形	43.00%	46.53%	50.11%	58.34%	72.36%	43.00%~72.36%
空心方形	48.03%	52.68%	63.08%	74.82%	81.41%	48.03%~81.41%

2.4 贯入角度影响

固定机具类型及贯入速度时,增大贯入角度以观察贯入阻力变化,其不同角度下结构稳定的U形、空心方形机具贯入阻力如图9所示.U形与空心方形机具各角度下贯入阻力增长率及范围如表5所示,总体上机具所受贯入阻力随贯入角度的不断增大而呈现出增大趋势.

2.5 形状影响

以贯入角度 30°、贯入速度 5 mm/s 条件下的试验为例,贯入阻力的大小也取决于机具截面形状大小,其决定了机具贯入土体时与模拟月壤的接触面积,四种不同截面尺寸机具的贯入阻力比值近似为 1:2:3:4,不同试验条件下的贯入阻力也满足该规律,如图6所示.将不同截

面形状机具贯入阻力相加,得到随贯入深度增加下的贯入阻力(图10),三种不同贯入角度下L形机具贯入阻力可由两个一字形机具贯入阻力组合得到,而空心方形可由U形与一字形或两个L形机具组合而成,如图11所示.实际机具的贯入阻力可以由几种不同几何截面的贯入阻力数据叠加得到,即两个一字形贯入阻力叠加可获得L形贯入阻力;而空心方形贯入阻力可由U形与一字形或两个L形的贯入阻力叠加获得,即该采样机具可通过模块化方式实现组装.

不同贯入条件对于机具的模块化组装也有着不同程度的影响,使得组合机具与实际机具之间存在着一定的误差,故对各类试验条件下的误差大小进行分析,将组合机具与实际机具的误差率E定义为:

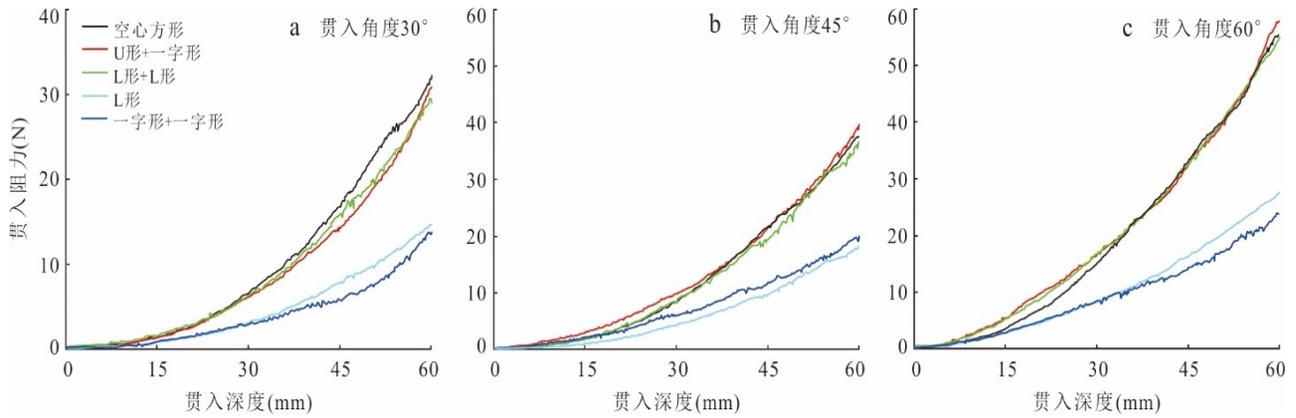


图 10 模块化验证

Fig.10 Modular verification

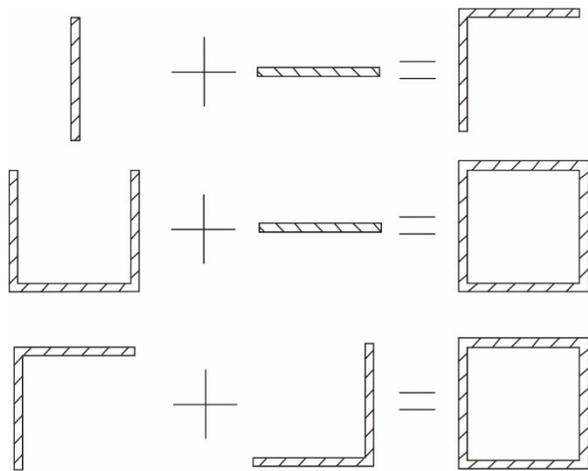


图 11 模块化机具组合

Fig.11 Modular machine combination

$$E = (P - C) / P, \quad (2)$$

其中, P 为实际机具贯入阻力, N ; C 为组合机具贯入阻力, N .

三种不同组合方式所造成的误差如图 12 所示. 各类机具在保持贯入速度(斜向速度)一定时, 随贯入角度增大, 不同角度下机具在刚入土的 0~5 mm 内均因为机具与土体存在不完全接触使机具发生颤颤致使误差呈现巨大波动; 而在机具进入土体后产生波动的原因主要由机具与土体中橄榄石、辉石等大颗粒挤压造成. 随机具逐渐进入土体深处, 由于机具颤颤造成的误差呈现波动式下降, 直至在 30~60 mm 深度范围内达到稳定状态, 且误差大小均不超过 15%, 如表 6 所示.

同一截面机具随着贯入角度的不断增大, 进入相同贯入深度时机具在水平方向上的运动路径变短, 对土体扰动范围减小, 从而组合机具的误差也减小; 而对于截面形状较简单的组合机具, 由于组合方式稳定性较差易产生相对较大的误差. 在未来进行月壤采样设备结构参数设置时, 可针对采样机具选择整体强度更高、质量更小的材料减少月岩颗

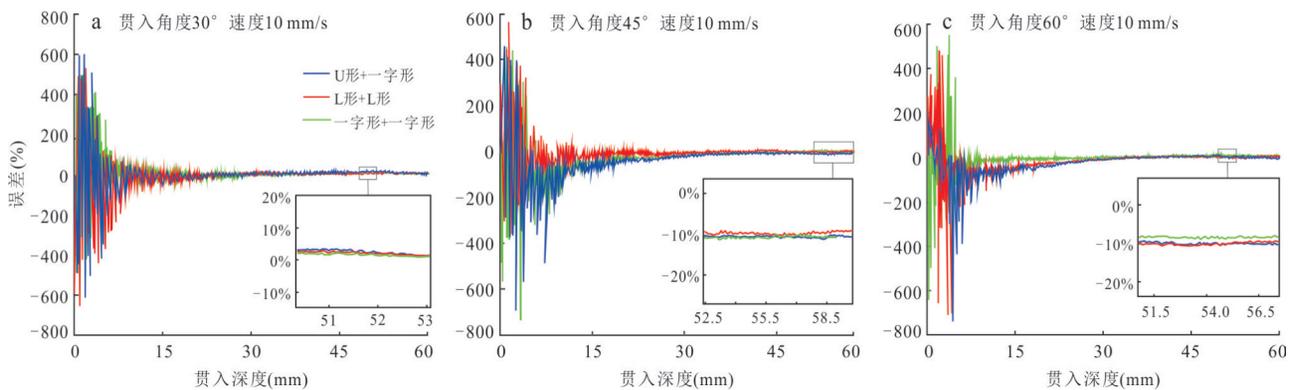


图 12 组合机具平均误差

Fig.12 Average error of combined equipment

表 6 不同机具结构模块化组合后的平均误差率

Table 6 The average error rate after modular combination of different machine structures

组合类型	贯入角度 30°, 贯入速度 10 mm/s			贯入角度 45°, 贯入速度 10 mm/s			贯入角度 60°, 贯入速度 10 mm/s		
	0~15 mm	15~30 mm	30~60 mm	0~15 mm	15~30 mm	30~60 mm	0~15 mm	15~30 mm	30~60 mm
U+一	578.23%	-2.49%	12.00%	-159.05%	-36.06%	-2.70%	-470.58%	-34.01%	-0.42%
L+L	670.13%	-4.72%	7.96%	-448.62%	-3.39%	3.95%	-602.46%	-0.26%	-0.43%
一+一	-305.00%	-2.54%	7.70%	142.35%	35.38%	9.25%	-593.20%	-3.88%	5.49%

粒对运动中的机具造成的震颤影响;同时未来进行月壤采样时可在入土阶段使用低速钻进,降低震颤对采样设备本身造成的危害,待机具进入土体后可适当提升贯入速度以提高采样效率.

3 采样机具模块化理论模型

3.1 采样机具模块化理论建模

本文采用“一”字形“L”形“U”形和“空”方形”四种不同机具完成了不同条件下对模拟月壤的贯入试验.为验证采样机具可由模块化组装而成,可对“一”字形”机具进行受力分析,建立其对应的贯入阻力数学模型,随后验证其余各类机具可由其模块化组合而成.

3.2 “一”字形”机具贯入阻力模型

设“一”字形”机具底面截面长为 a , 宽为 b , 机具贯入过程中与土体间夹角为 α , 某时刻贯入土体的竖向深度为 h . 将“一”字形”机具沿贯入方向运动时所受贯入阻力进行简化分析, 进入土体部分的机具被划分为 5 个面(D 面前后两面相同), 如图 13 所示, 并基于朗肯被动土压力理论依次分析各个面上的受力, 最后通过应力叠加原理建立“一”字形”机具贯入阻力模型.

一”字形”机具在贯入土体后某时刻竖向深度达到 h 时, 在 A 面上受平行于该面的被动土压力 E_A 和剪切力 F_{tA} , 如图 14 所示.

对 A 面所受土压力进行计算, 其所受被动土压力是由 A 面上每一点的土压力强度叠加而成; 某时刻达到竖向贯入深度 h 时, A 面上所受剪切力为土体抗剪强度在剪切破坏面上的积分, 可通过式 (3) 计算:

$$\begin{cases} E_A = \int_{S_A} \sigma_p ds = \frac{1}{2} k_p \gamma \frac{(h - a \cos \alpha) a^2}{\tan \alpha} + \frac{1}{6} k_p \gamma \frac{a^3 \cos \alpha}{\tan \alpha} \\ F_{tA} = \int_{S_A} \tau_f ds = \int_{S_A} (c + \sigma_p \tan \varphi) ds \end{cases}, \quad (3)$$

其中, E_A 为采样深度 h 时机具 A 面所受被动土压力, N; σ_p 为被动土压力强度, $\sigma_p = \gamma h k_p + 2c(k_p)^{1/2}$, kPa;

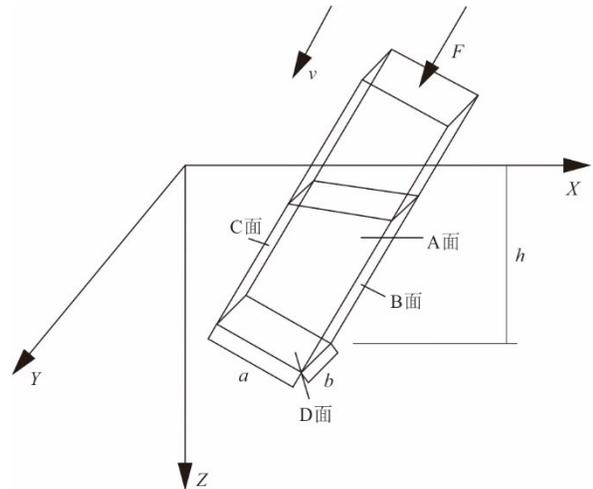


图 13 “一”字形”采样机具贯入模型

Fig.13 The penetration model of “one-shaped” sampling machine

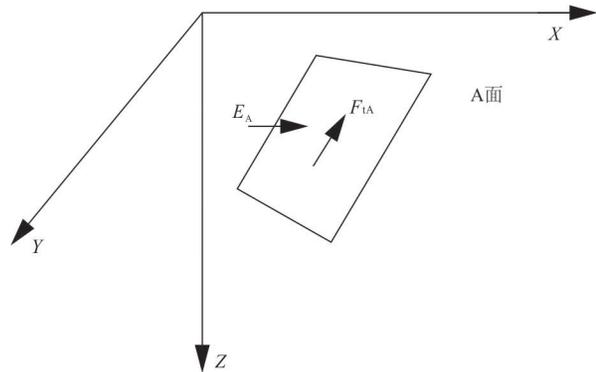


图 14 机具 A 面受力

Fig.14 Force on A surface of machine

c 为月壤粘聚力, kPa; γ 为模拟月壤重度, N/m³; h 为某时刻竖向贯入深度, m; b 为机具底面宽度, m; τ_f 为抗剪强度, $\tau_f = c + \sigma_p \tan \varphi$, kPa; S_A 为机具 A 面与模拟月壤接触面积, m².

对 B、C、D 面所受力进行计算, 其各面上所受力可对底部宽度方向上对 XZ 平面投影进行整体受力分析, 如图 15 所示, 后沿 Y 轴方向对底部宽度 b 进行积分获得.

B 边上作用有被动土压力 E_B 、剪切力 F_{tB} 及下部

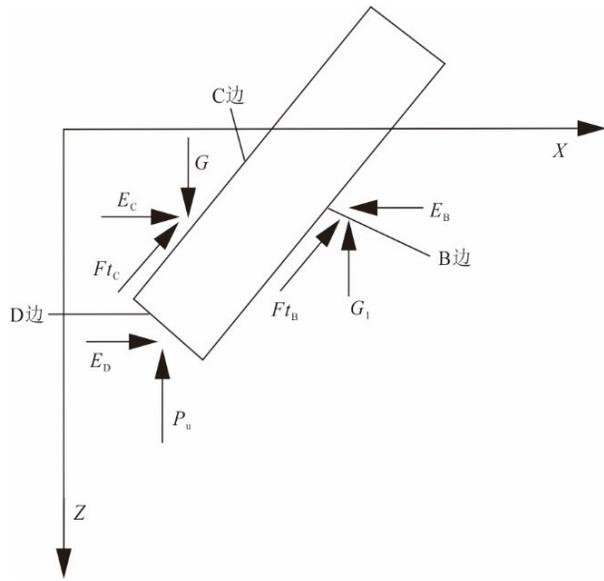


图 15 机具 B 边、C 边、D 边受力
Fig.15 B side, C side, D side force of the machine

模拟月壤对其的支持力 G_1 ，土体对于 B 边的支持力 G_1 等同于 C 边上所受到的上部模拟月壤的重力 G 。其计算公式如式(4)：

$$\begin{cases} E_B = \int_{S_B} \sigma_p dl = \frac{1}{2} k_p \gamma b h^2 \\ G_1 = \frac{\gamma(h - a \cos \alpha)^2 b}{2 \tan \alpha} \\ F_{tB} = \int_{S_B} \tau_f ds = \int_{S_B} (c + \sigma_p \tan \varphi) ds \end{cases}, \quad (4)$$

其中， S_B 为机具 B 面与月壤接触面在深度方向上的投影， m^2 。

C 边作用有被动土压力 E_C 、上部模拟月壤重力 G 和剪切力 F_{tC} 。被动土压力 E_C 为对 C 边在竖直方向上的投影进行积分；重力 G 为体积与重度乘积。其计算公式如式(5)：

$$\begin{cases} E_C = \int_{S_C} \sigma_p dl = \frac{1}{2} k_p \gamma (h - a \cos \alpha)^2 b \\ G = \frac{\gamma(h - a \cos \alpha)^2 b}{2 \tan \alpha} \\ F_{tC} = \int_{S_C} (c + \sigma_p \tan \varphi) ds \end{cases}, \quad (5)$$

其中， S_C 为机具 C 面与月壤接触面在深度方向上的投影， m^2 。

D 边所受力为被动土压力 E_D 和地基承载力 P_u 。被动土压力 E_D 为对 D 边在竖直方向上的投影进行积分，其计算公式如式(6)：

$$\begin{cases} E_D = \int_{S_D} \sigma_p ds = \int_{h-a \cos \alpha}^h \sigma_p dh \\ P_u = \int_{S_D} (c N_c + q N_q) ds \end{cases}, \quad (6)$$

其中， S_D 为机具 D 面与月壤接触面在深度方向上的投影， m^2 ； N_c 、 N_q 为承载力系数， $N_c = \cot \varphi [\exp(\pi \tan \varphi) \tan^2(45^\circ + \varphi/2) - 1]$ ， $N_q = \exp(\pi \tan \varphi) \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ 。

根据应力叠加原理，将机具 B、C、D 面上受力进行组合，如图 16 所示，可得一字形机具贯入阻力 F ：

$$F = F(a, b, h, \alpha, c, \rho, \varphi) = 2F_{tA} + F_{tB} + F_{tC} + (P_u + G_1 - G) \sin \alpha + (E_C - E_B + E_D) \cos \alpha + \mu(G_1 + G) \cos \alpha \quad (7)$$

其中， F 为一字形机具所受贯入阻力， N ； μ 为机具与模拟月壤间摩擦系数，试验测得为 0.45。

依据模块化理论可将若干个一字形机具受力进行叠加得到复杂机具的受力，如式(8)所示：

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n F_i(a, b, h, \alpha, c, \rho, \varphi). \quad (8)$$

3.3 理论模型与试验结论校核

依据 3.2 节所述理论模型，可通过模块化组合依次计算得到“一字形”机具的贯入阻力理论值，结合物理试验所获得的贯入阻力实测值，其中部分理论值及实测值对比如图 17 所示。

由图 17 可知，理论模型结果与试验结果趋势类似，其贯入阻力增长率与贯入深度、贯入角度和机

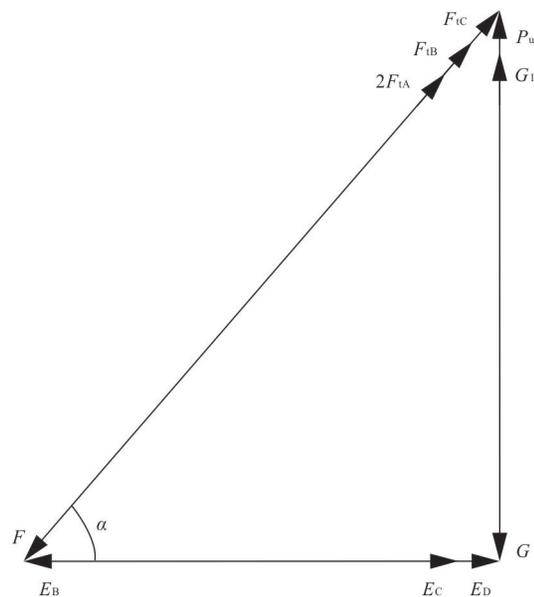


图 16 机具闭合受力
Fig.16 Closed force of machine tools

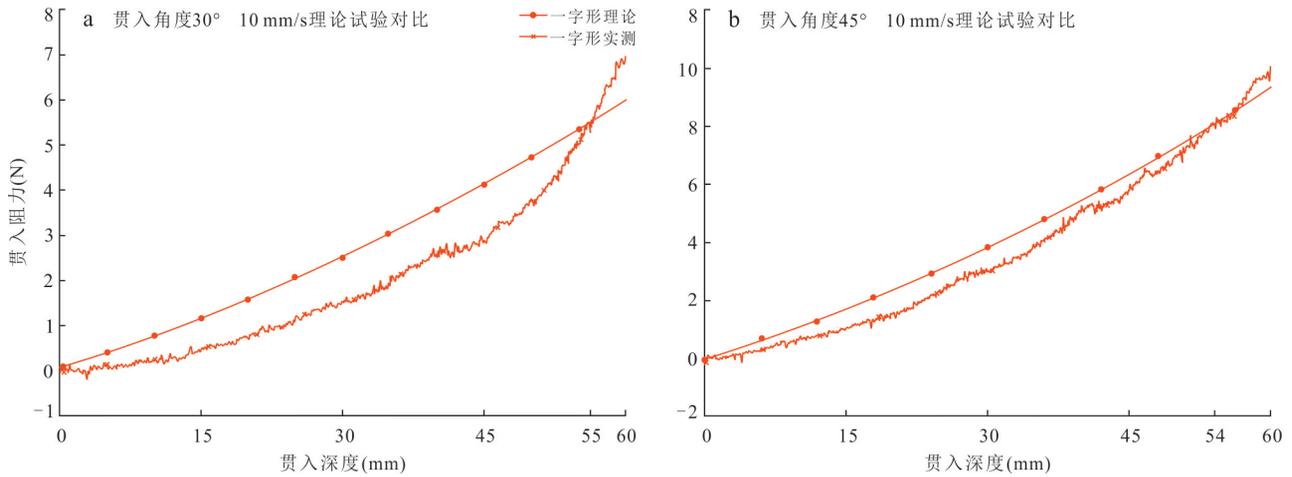


图 17 试验数据与理论数据对比

Fig.17 Comparison of experimental data and theoretical data

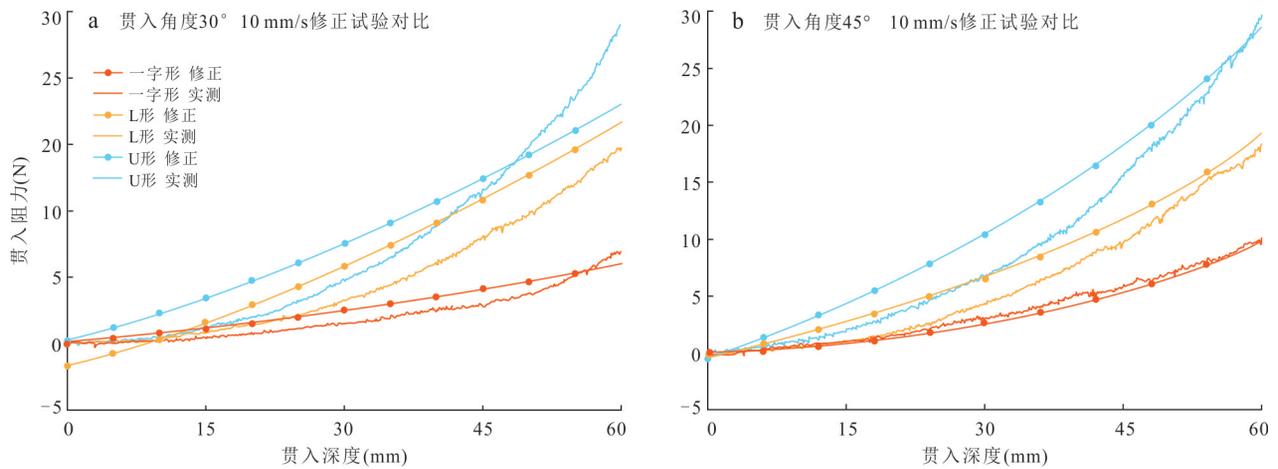


图 18 试验数据与修正理论数据对比

Fig.18 Comparison between experimental data and modified theoretical data

具截面大小均呈正相关,贯入阻力在 0~55 mm 贯入深度范围内理论值大于实测值,而在 55~60 mm 范围内实测值超过理论值.模拟月壤作为一种松散的颗粒状材料,在铺撒过程中土体会发生自然沉降且下层土体会受到上层土体的压实作用,从而使土体密实程度呈现出随贯入深度而增长的规律,而土体的密实程度与机具所受贯入阻力息息相关.故在 0~55 mm 深度间月壤密度不断增大直至与月壤密度理论值相等,超过该深度月壤密度持续增长使实测贯入阻力大于理论值.而理论模型计算时是将深度方向上的密实程度视为定值,故图 17 中试验结果均表现为低贯入深度时贯入阻力小于理论值,随贯入深度增长其贯入阻力也不断增长,直至接近或超过理论值,针对该情况为使理论模型满足实际贯入过

程,需要对该理论模型进行修正降低误差.

试验结果与理论模型对比出现误差的主要因素为沿深度方向上模拟月壤密实程度发生变化,故用模拟月壤的贯入深度对理论模型完成修正.计算筛选得到的理论模型密度下对应的修正函数表达式如下,其 R^2 为 0.821:

$$y = 43\ 723.493h^3 - 2\ 578.187h^2 + 12.399h - 0.353, \quad (9)$$

结合式(8)可获得修正后机具所受贯入阻力 F' 表达式如下:

$$F' = \sum_{i=1}^n F_i + y. \quad (10)$$

经修正后得到理论值与实测值的对比结果如图 18 所示.不同试验条件下修正后的一字形机具与试验结果平均误差最小为 7.4%,

但随着机具形状不断变复杂,理论模型与试验结果产生的误差增大,但总体而言该模型的平均误差率仅为 11.59%,尚属可接受的范围内。

4 结论

对月壤采样机具钻进过程中的受力变化规律进行研究分析是提高月壤钻进效率的有效途径,同时也是进行后续月壤深层钻进、资源开采甚至月表基地建设的必要基础。本文以 CUG-1A 模拟月壤为研究对象,从机具类型、贯入角度、贯入速度和贯入深度 4 个试验参数对机具钻进过程中受到的贯入阻力进行了分析,并通过建立理论模型验证了机具模块化理论的可行性,主要结论如下:

(1) 本文试验条件下,机具贯入阻力大小总体上随贯入深度、贯入机具的截面面积及贯入角度的增加而增大;四种贯入机具在 0~15 mm 的浅层深度时贯入阻力增长平稳,15~45 mm 的次浅层深度贯入阻力出现明显增长,45~60 mm 的深层深度贯入阻力出现陡增,且增长率最大。

(2) 不同截面形状的贯入机具贯入阻力与其边长成比例;且在除机具形状以外的同类型试验条件下复杂机具的贯入阻力与简单机具的受力叠加数据吻合,即该采样机具可采用模块化方式组装;模块化机具在浅层土体中由于机具与土体的不完全接触导致误差较大,而在机具进入深层土体后误差减少到 15% 以内。

(3) 以“一字形”机具为基础建立了采样机具理论模型,并将理论模型与试验结果进行比较验证了模块化理论的可行性;针对模拟月壤存在的密实程度不均的情况对模型进行了修正,其精度在 85% 以上。

致谢:感谢匿名审稿专家提供的有益建议!

References

- Agui, J. H., Bucek, M., DeGennaro, A., et al., 2013. Lunar Excavation Experiments in Simulant Soil Test Beds: Revisiting the Surveyor Geotechnical Data. *Journal of Aerospace Engineering*, 26(1): 117–133. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0000249](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0000249)
- Cai, H. H., Peng, Z. B., 2015. Taking the Moon Drilling as an Example to Explore Exoplanet Drilling Technology. *Science & Technology Vision*, (16): 6–7 (in Chinese with English abstract).
- Chen, T., Zhao, Z., Wang, Q., et al., 2019. Modeling and Experimental Investigation of Drilling into Lunar Soils. *Applied Mathematics and Mechanics*, 40(1): 153–166. <https://doi.org/10.1007/s10483-019-2410-8>
- Gao, H., Duan, L. C., Li, Q., et al., 2014. Surface Sampling Experiment for Lunar Soil Simulant. *Geological Science and Technology Information*, 33(6): 175–179 (in Chinese with English abstract).
- Green, A., Zaczny, K., 2014. Effect of Mars Atmospheric Pressure on Percussive Excavation Forces. *Journal of Terramechanics*, 51: 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.11.001>
- Gu, Y., Sun, J. Y., Xiao, Q., et al., 2022. Morphology of Lunar Soil Returned by Chang'E-5 Mission and Implications for Space Weathering. *Earth Science*, 47(11): 4145–4160 (in Chinese with English abstract).
- Johnson, L. L., King, R. H., 2010. Measurement of Force to Excavate Extraterrestrial Regolith with a Small Bucket-Wheel Device. *Journal of Terramechanics*, 47(2): 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2009.08.002>
- King, R. H., Van Susante, P., Gefreh, M. A., 2011. Analytical Models and Laboratory Measurements of the Soil-Tool Interaction Force to Push a Narrow Tool through JSC-1A Lunar Simulant and Ottawa Sand at Different Cutting Depths. *Journal of Terramechanics*, 48(1): 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2010.07.003>
- Li, Q., Xie, L. L., Li, J. P., 2019. Modular Motion-Structure Design Model for Planetary Surface Sampling. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019: 5987306. <https://doi.org/10.1155/2019/5987306>
- Li, Q., Gao, H., Xie, L. L., et al., 2021. Review of Research about Lunar Drilling Technology. *Drilling Engineering*, 48(1): 15–34 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. Y., Wang, L. S., Sun, Q. C., et al., 2018. Drilling Experiment of Simulated Icy Soil of Lunar Polar Region. *Science Technology and Engineering*, 18(25): 256–261 (in Chinese with English abstract).
- Maciejewski, J., Jarzębowski, A., Trąpczyński, W., 2003. Study on the Efficiency of the Digging Process Using the Model of Excavator Bucket. *Journal of Terramechanics*, 40(4): 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2003.12.003>
- Obermayr, M., Dressler, K., Vrettos, C., et al., 2011. Prediction of Draft Forces in Cohesionless Soil with the Discrete Element Method. *Journal of Terramechanics*, 48(5): 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2011.08.003>
- Pan, Y. X., Wang, C., 2021. Developing the Planetary Sci-

- ence Research for the Sustainable Deep Space Exploration of China. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 35(2): 181–185 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Y., Feng, Y.J., Sun, Q.C., et al., 2019. Simulation and Experimental Study on the Effect of Large Granular Rocks in Lunar Soil on Drilling Load. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 55(3): 397–404 (in Chinese with English abstract).
- Quan, Q. Q., Tang, J. Y., Yuan, F. P., et al., 2017. Drilling Load Modeling and Validation Based on the Filling Rate of Auger Flute in Planetary Sampling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(1): 434–446. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.05.003>
- Tang, J. Y., 2020. Research on the Characteristics of Adaptive Drilling and Coring into High Compacted Lunar Regolith Simulant (Dissertation). Harbin Institute of Technology, Harbin (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Deng, Z. Q., Tang, D. W., et al., 2012. Structure Parameters Optimization and Simulation Experiment of Auger in Lunar Soil Drill - Sampling Device. *Journal of Mechanical Engineering*, 48(23): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- Wu, W. R., Yu, D. Y., 2014. Development of Deep Space Exploration and Its Future Key Technologies. *Journal of Deep Space Exploration*, 1(1): 5–17 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, L., He, X. X., Wu, T., et al., 2009. Properties and Simulation of Lunar Soil CUG - 1A. Seventh Annual Conference of the Society of Space Science, Dalian (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T., Ding, X. L., 2017. Drilling Forces Model for Lunar Regolith Exploration and Experimental Validation. *Acta Astronautica*, 131: 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.11.035>
- Zhao, Z., Chen, T., Pang, Y., 2019. Optimum Parameter Matching Obtained by Experiments for Coring Drilling into Lunar Simulant. *Advances in Space Research*, 63(7): 2239–2244. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.025>
- Zhao, Z. J., 2014. Lunar Surface Sampling Study on Mechanical Characteristics of Tool - Soil Interaction (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. O., 2014. Mechanical Model on Interaction between Drill Bit and Lunar Soil and Finite Analysis (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 蔡黄河, 彭振斌, 2015. 以月球钻探为例探索地外星球钻探技术. *科技视界*, (16): 6–7.
- 高辉, 段隆臣, 李谦, 等, 2014. 模拟月壤表层采样试验研究. *地质科技通报*, 33(6): 175–179.
- 顾敏, 孙继尧, 肖倩, 等, 2022. 嫦娥五号返回月壤微观形貌特征及其对太空风化的指示意义. *地球科学*, 47(11): 4145–4160.
- 李谦, 高辉, 谢兰兰, 等, 2021. 月球钻探取样技术研究进展. *钻探工程*, 48(1): 15–34.
- 刘德赞, 王露斯, 孙启臣, 等, 2018. 月球极区冻土模拟月壤钻进试验研究. *科学技术与工程*, 18(25): 256–261.
- 潘永信, 王赤, 2021. 国家深空探测战略可持续发展需求: 行星科学研究. *中国科学基金*, 35(2): 181–185.
- 庞勇, 冯亚杰, 孙启臣, 等, 2019. 月壤大颗粒对钻进力载影响的仿真及实验研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 55(3): 397–404.
- 唐钧跃, 2020. 高密实度模拟月壤自适应钻进取芯特性研究 (博士学位论文). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 田野, 邓宗全, 唐德威, 等, 2012. 月壤钻探采样装置中的钻杆结构参数优化设计及模拟试验. *机械工程学报*, 48(23): 10–15.
- 吴伟仁, 于登云, 2014. 深空探测发展与未来关键技术. *深空探测学报*, 1(1): 5–17.
- 肖龙, 贺新星, 吴涛, 等, 2009. 月壤的性质与模拟月壤 CUG-1A. 大连: 空间科学学会第七次学术年会.
- 赵振家, 2014. 月面表取采样机土作用力学特性研究 (硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 朱燕鸥, 2014. 钻头-月壤相互作用力学模型及仿真分析 (硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.